第28卷 第3期
2016年5月
腐蚀科学与防护技术
CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY
Vol.28 No.3
May 2016

专题介绍

高压直流输电系统对埋地金属管道的干扰研究现状

秦润之 杜艳霞 姜子涛 路民旭

北京科技大学 新材料技术研究院 北京 100083

摘要：阐述了高压直流输电系统对埋地金属管道的干扰机理及造成的危害，总结了国内外评估此干扰问题的现场测试方法，介绍了数值模拟计算方法在干扰研究中的应用以及影响因素与干扰规律，讨论了不同缓解方法的可行性，最后指出了当前研究存在的问题，并展望了该领域的发展趋势。

关键词：高压直流输电系统 直流干扰机理 测试方法 模拟计算 缓解方法

中图分类号：TG172 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-6495(2016)03-0263-06

1 前言

高压直流输电 (HVDC) 是一种高电压、大功率、远距离的直流输电技术。上世纪50年代起，国际研究证实了其容量大、损耗小、稳定度高等技术性优点，以及杆塔结构简单、线路造价低等经济性优点[1-5]，欧洲、北美、巴西、日本等国家和地区陆续修建了多条HVDC工程。我国能源需求与资源逆向分布，能源的大规模远距离运输不可避免，而HVDC尤其适合“西电东送”和“北电南送”等大型输电项目[6]。从80年代起我国陆续建设了一批HVDC工程，如舟山、天生桥-广州、宁东-山东、三峡-上海工程等，在“十二五”期间还将建造27回HVDC工程[2]，HVDC将在我国呈井喷式发展。

由于固有的技术特性，HVDC在运行中会不可避免的对周围埋地金属管道造成干扰，国外在早期运行中已出现多起案例[7-10]。而随着我国HVDC建设规模的日益扩大，国内的干扰问题在也逐渐暴露并日益严重[11-14]。研究表明，HVDC干扰不同于其他直流杂散电流干扰，具有影响范围大、干扰等级高、缓解困难等特点。为了对此类干扰的评估、测试及缓解提供参考，本文阐述了HVDC对埋地金属管道干扰机理，国内外相关的测试与计算方法，总结了缓解措施，并提出了当前存在的问题和未来展望。

定稿日期：2015-09-11

基金项目：国家自然科学基金项目 (51401017)，中央高校基本科研业务费专项资金项目 (FRF-TP-14-096A2) 资助

作者简介：秦润之，男，1990年生，博士生

通讯作者：杜艳霞，E-mail: duyanxia@ustb.edu.cn，研究方向为金属材料腐蚀与防护

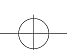
DOI: 10.11903/1002.6495.2015.265

2 HVDC对埋地金属管道干扰的机理及危害

某些HVDC运行模式需要使用大地作为一根导线，由接地极注入一定电流，HVDC对埋地金属管道的干扰就是通过大地回路产生的。当HVDC采用单极大地回路方式运行时，大地回路中为单极额定电流，可达数千安培，短时间内可在管道上引起高强度干扰；当采用双极不对称方式运行时，大地回路中为两极电流之差；当采用双极对称方式运行时，大回路中为不平衡电流，为额定电流的1%~7%[15,16]，虽然数值较小，但常年持续散流，其累积效应也相当可观。

当埋地金属管道位于大地电流场中时，部分入地电流从漏点或涂层处流入管道，通过钢铁管体这种低电阻导体传输，然后在远处释放，电流的流入点和流出点均产生干扰。某些长输管道的受干扰距离可达数百公里。管道吸收、传递、释放电流的位置取决于管道的走向、入地电流的极性和土壤结构。当接地极阳极放电时，管道靠近接地极的部分吸收电流，电位负向偏移，管道远端释放电流，电位正向偏移，如图1所示；当接地极阴极放电时则相反，如图2所示。土壤结构也可能影响管道吸放电情况，例如某案例中管道与低电阻石墨矿脉交叉，电位波动与周围管段相反[7,17]。

HVDC干扰可以对管道、人员以及相关设备造成危害或破坏。对于管道，其吸收电流、电位负移的部分会发生阴极析氢或吸氧反应，使得涂层剥离或高强度钢氢脆风险大大增加；管道释放电流、电位正移的部分在金属/土壤界面会发生钢铁溶解的电化学反应，产生腐蚀问题，根据法拉第定律，每年1 A/m^2



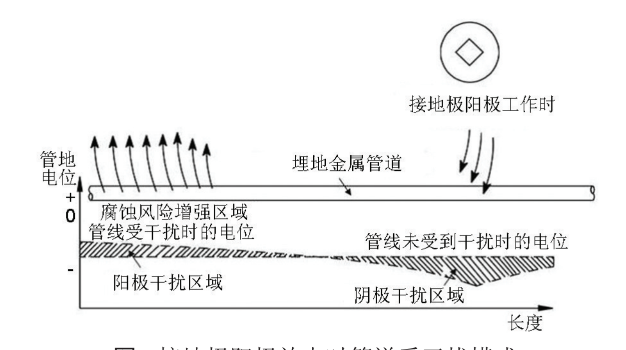


图1 接地极阳极放电时管道受干扰模式

Fig.1 Interference on pipelines caused by electrodes in anodic condition

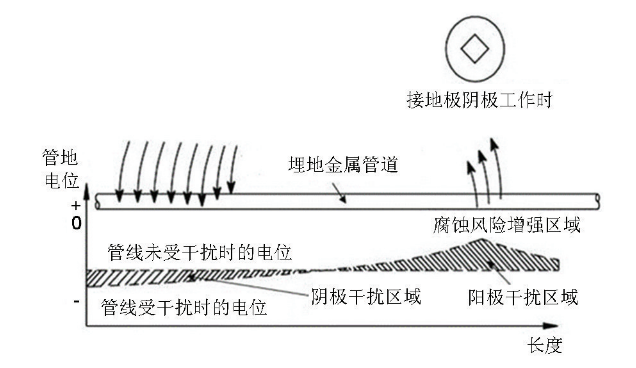


图2 接地极阴极放电时管道受干扰模式

Fig.2 Interference on pipelines caused by electrodes in cathodic condition

的电流会造成管壁1.16 mm的减薄，而漏点处泄漏电流密度可能远大于此值，因此管道有很高的腐蚀风险。由于接地极阴极放电或阳极放电的工作模式不确定，所以管道的近端和远端都有腐蚀或氢脆、涂层剥离的风险[13,17]。对于人员，国家标准规定稳态时接触电压的限值为35 V[18]，当大地回路中电流过大时，管道引入大量电流，管地通电电位可能超过限值标准，造成人员触电危险。同理，对管道及阀室中的设备，接地部分与未接地部分电压差过高时可能引起打火甚至烧蚀破坏。

事实上，不仅对于埋地管道，HVDC对临近的其他埋地金属设施如杆塔接地、通信电缆、铁轨信号系统、导航系统等都有一定干扰[19-21]。

3 HVDC对埋地金属管道干扰的现场测试方法

在不同环境中，HVDC造成的干扰程度不同，国际上尚没有针对HVDC干扰测试的相关标准和统一的测试方法。目前实际生产中常采用管地通电电位、土壤地电位梯度等参数对干扰程度进行评估。这些方法大都简单传统，便于在日常维护中快速测量。某些学者也进行了泄漏电流密度的测试实验以获得管道的腐蚀速率[22]。下面总结了国内外HVDC干扰案例中采用的现场测试方法及测试参数。

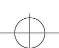
3.1 管地通电电位

正常运行的管道的管地通电电位一般较稳定，但受HVDC干扰时，电流在管道表面的流入、流出会造成管地电位负移或正移，因此管地通电电位的变化可以反映出管道的受干扰程度及接触电压的风险。国内外案例中最常见的测试方法就是管地通电电位测量。

李丹丹[14]在国内某条管道的长期监测中发现，当受到某±500 kV HVDC的干扰时，管地电位最正值为2900 mV(*vs* CSE，以下同，特殊说明除外)，最负值为−3000 mV，远超过阴极保护的标准要求，受干扰时间达数小时。川气东送管道某次受到±800 kV向家坝-上海HVDC干扰时，宜昌阴极保护站周围电位偏负，最负达−2900 mV，影响范围达40 km。复奉线的干窑阀室至上海末站之间管道电位波动值达930 mV，忠武线也有类似的电位变化[12]。西气东输管道芙蓉-上海段受±500 kV三峡-上海HVDC干扰。某次单极大地运行期间，无锡以东管道的管地通电电位出现大幅负向偏移，偏移幅度达1410 mV；无锡以西管道的管地通电电位则出现大幅正向偏移，幅度达830 mV[13]。

国外一些案例中也采取了测试管地通电电位对HVDC干扰进行评估的方法。北美Trans Mountain原油管道受260 kV British Columbia-Vancouver Island输电系统的干扰，管地电位的偏移量与接地极放电的大小呈正比。当接地极1320 A放电时，管地电位最大可偏移400 mV[10]。巴西一条660 m灌溉管道位于Ibiúna接地极东南3 km处，受±600 kV Itaipu输电工程干扰。管道中部有一处绝缘法兰，当法兰跨接时沿线管地通电电位连续下降，从21 V下降到−46 V，法兰附近电位为5 V左右；当法兰绝缘时沿线管地通电电位有一处突变，法兰之前的电位从从14 V下降到−18 V，法兰之后的电位从13 V下降到−22 V。由以上变化可知，将管道中部电绝缘可以降低两端的干扰水平，但会在绝缘法兰附近引入更高的干扰；当绝缘法兰跨接时，最高的管地电位足以引起人体触电的危险[9]。

以上测试时接地极均为稳态放电模式，国外在现场探索了接地极波形放电的实验，如Verhie[10]在测试中使用了“通电3 min—断电2 min”的波形，多次测试后将结果线性外推以便统一比较；Nicholson[7]在测试中将接地极设置为“4 min阳极放电—2 min停止放电—2 min阴极放电—4 min停止放电”的波形，当接地极1200 A放电时干扰严重区域的管地电



位可以变化900 mV以上。使用一定的波形放电可以在测量结果中分辨试验段，排除地磁干扰，判断试验管段电流的流入流出方向[7]。国内尚未有接地极波形放电的测试案例。

使用管地通电电位测试虽然直观方便，但其中包含了相当数量级的IR降，无法准确获得真实的金属极化电位，也就无法推断出真实的腐蚀速率或析氢反应的速率。这一点限制了管地通电电位的实际应用效果。

3.2 地电位梯度

接地极放电时，其上方土地的峰值电位可达上千伏，接地极附近的大地会呈现一定的电位梯度。当附近埋地管道位于其中时，电流会从电位高的管段流入，从电位低的管段流出[23]。一般地电位梯度越大，相邻管段电位差越大，流入或流出管道的电流越大。因此管道周围的地电位梯度也可以表征管道受干扰程度。电力公司和管道公司也都有相应的地电位梯度测试标准[24,25]。

Caroli等[26]在巴西±600 kV Itaipu工程的接地极周围进行了地电位梯度测试，在接地极周围1公里以内达到最大值1300 V/km，然后随着远离接地极而迅速下降，在2 km处降至160 V/km，3 km处降至60 V/km。研究发现，当近距离存在两个接地极时，可能互相影响。当Ibiúna接地极II建成后，接地极I周围的地电位梯度也有所变化：两个接地极之间的地电位梯度明显变大；新接地极周围电位梯度接近为0；超过新接地极的影响范围后电位梯度又恢复为原来的数值[26]。

目前地电位梯度方法面临一些问题。在测量方面，地电位梯度易受土壤电阻率、其他干扰电流以及局部漏点或试片附近的电场影响，重现性不好。国内直流干扰防护标准GB 50991-2014[24]中规定，在设计阶段的管道，可采用土壤直流电位梯度对直流杂散电流进行评估："对于设计阶段的管道，当土壤直流电位梯度大于0.5 mV/m时，确认存在直流杂散电流"。而且电位梯度的数据与管道的受干扰程度没有定量关系，仅能定性比较大小，这些都大大限制了地电位梯度的实用性。

3.3 泄漏电流密度

钢铁的泄漏电流密度是评价管道腐蚀反应速率或析氢反应速率的重要指标，目前可采用ER腐蚀探头、腐蚀试片等方法进行测量，但目前尚没有实际现场案例中获得的泄漏电流密度测试数据。

Hopper等[22]通过室内试验研究了管道受干扰时平均泄漏电流密度和漏点泄漏电流密度的关系。在设计或模拟计算中，管道涂层的平均泄漏电流密度是易知的，并且数量级较小。但试验发现，漏点泄漏电流密度比平均泄流电流密度大4~6个数量级，而且小漏点受干扰更大。例如当管地通电电位为15 V(*vs* SCE)且漏点为1.44 ft^2时，漏点的泄漏电流密度达2.20 A/ft^2，当漏点尺寸为0.144 ft^2时，漏点电流密度达8.75 A/ft^2，按照法拉第定律计算获得的腐蚀速率为109.25 mm/a。这说明虽然平均电流密度很小，但管道上漏点处的泄漏电流密度却很高，因此仍可能出现严重的腐蚀问题。

泄漏电流密度与管体表面反应的速率正相关，是一种直观的测试方法。但与管地通电电位测试和地电位梯度测试相比，需要预埋设试片，方法相对复杂，同时，试片面积和位置的选取直接影响到测量结果，是泄露电流密度测试的难点。

4 计算方法在HVDC干扰研究中的应用

4.1 计算方法的发展

早期在HVDC设计阶段往往使用镜像行波法计算接地极参数：当处于分层介质中时，将接地极对每个边界做镜像等效，然后把等效后的电势结果叠加而成实际电势分布。国内外研究人员使用镜像行波法得出了一些结果。Lagacé等[27]计算了单圆环接地极在4层以下土壤中的电势分布、地电位梯度以及接地极溢流情况；陈水明等[27]计算了三圆环接地极与单圆环接地极影响的区别；Kovarsky等[29]计算出Itaipu高压直流工程的两个接地极处的地电位梯度，与实测值相比相差不大。

传统计算方法只适用于简单结构的土壤，无法对实际复杂的土壤结构进行计算，数值模拟计算技术为复杂情况下的计算提供了有效解决途径。徐韬等提出了电阻网络模型法，将整个计算场域转换为基本电路网络模型进行数值求解[30]；陆继明等采用有限元法，使用通用软件分析了土壤电阻率不均匀的复杂模型，讨论了地形对地表电势场的影响[31]；李丹丹[14]使用ANSYS软件的CFX模块计算了HVDC干扰中各种参数的影响规律；Jardini等[32]计算了巴西Rio Madeira-Araraquara直流输电工程的干扰程度；Chen等[33]计算了广东某共用接地极对附近交流变电站、发电站及铁轨系统的影响；Ruan等[34]使用加拿大SES公司开发的工程软件CDEGS及其模块MALZ，分别研究了环形接地极、星形接地极、线形接地极等在不同土壤中的地电位分布；张富春等[23]通过CDEGS软件计算了鱼龙岭接地极附近的地电位分布；Zhang等[11]使用CDEGS软件研究了深层土壤结构对地电位梯度的影响。

由上可见，不断发展的模拟计算方法为预测和缓解HVDC干扰提供了快速高效的工具，使用专用工程软件、完善导体和土壤模型数据库是模拟计算的发展趋势。已有的研究表明[11,14,17,19,22,28-30,34]，土壤模型和管道参数对干扰水平有较大影响，下面介绍研究成果。

4.2 土壤模型的影响

已有研究结果显示，土壤模型对HVDC入地电流的分布及对外界干扰程度有很大影响。李丹丹[14]研究了不同电阻率的均匀土壤对管道干扰程度的影响，得出结论：均匀土壤的电阻率越高，土壤回路的阻抗越大，电流更趋向流经管道回路，相应管道泄漏电流密度、管地电位、管道纵向电流密度越大。

文献[11,17,19,28,29,34]分别研究了水平分层土壤模型对管道干扰程度的影响。通常表层土壤电阻率有固定的取值范围，当中下层土壤电阻率过高时，会迫使更多的入地电流通过表层的土壤流动，因此在管道上引起更大干扰。另外就建模深度方面，Zhang等[11]指出，当考察远离接地极几十公里的位置时，深层土壤就会显著影响地电位梯度，且考察点距离越远，表层土壤越薄，深层土壤的影响越大。Hopper等[22]也指出合适土壤模型的三维尺度应该相当，深度不应过小。

与实际相比，水平分层的土壤模型也很粗糙。理论上各种不均匀的地理结构，如河流、矿脉、特殊土壤等，都会对局部电流分布造成一定影响。陆继明等[30]计算研究了部分特殊结构，认为海洋侧地表电位梯度会增大，干扰也增大，高山侧无明显影响。

由上可以看到，土壤模型对于HVDC干扰程度有重要影响，因此在实际问题中，如何获取准确的土壤模型，并进行准确的建模，是影响计算结果准确性的重要因素。

4.3 管道参数的影响

除了土壤模型，管道的各项参数对HVDC干扰水平也有很大影响。文献[14,17,22]分别模拟计算了不同模型管道半径、涂层电阻率、管道-接地极距离、埋深等因素对管道干扰的影响规律，为干扰评价工作及缓解设计工作提供了一定依据。研究表明，当管径增大时，相对于土壤通路，管道通路的径向电阻减小，因此干扰明显增大，管地电位和泄漏电流密度呈二次函数的规律增加。当涂层面电阻率增大时，管道接地电阻增大，管地电位升高而平均泄漏电流密度降低。当管道-接地极距离减小时，管道各项干扰程度呈指数型增大，由此可见管道与接地极过于接近时干扰程度急剧增大，对管道造成巨大危害，同时增加了缓解工作的难度，设计时应尽量避免这种情况。对涂层较好的管道而言，改变管道埋深或管道临近的土壤电阻率，干扰水平没有明显的变化。

5 HVDC干扰的缓解措施

一般直流干扰的缓解方法有排流保护、跨接保护、阴极保护等，国内直流干扰防护标准GB 50991-2014[24]提出了多种缓解措施。这些措施主要针对轨道交通造成的干扰，当HVDC干扰程度较小时可以应用。例如，北美某管道受260 kV British Columbia-Vancouver Island输电线路的干扰，管地电位偏移400 mV。Verhiel[10]在干扰最严重处附近增设了三部恒电位仪输出反向电流，它们的保护范围互相重叠，保护了周围临近管段，达到了较好的缓解效果。

然而在我国，某些严重的HVDC干扰的范围广、入地电流大，远超一般直流干扰的水平，现有的缓解方案很难满足需求。例如，国内西气东输某段管道受某±800 kV HVDC干扰，管地电位最高达数百伏，采用了传统方法缓解，具体有：加强防腐层等级和防腐层完整性；增加绝缘接头；增加备用阴极保护站，采取强制排流保护；安装牺牲阳极排流等[13]。但由于此干扰程度特别高，这些缓解工作并没有将干扰降低到安全水平。

针对此类严重干扰，国内外尚没有成熟通用的缓解方案和标准。有一种思路是主动式缓解，Liu等[17]提出建立连续监测系统和自动调节排流系统，将管地电位的监测结果反馈并自动调节电源输出，以此将管地电位控制在合理的水平。理论上，这种缓解方案可以根据入地电流的大小和方向自动调整，做出最合理的响应。但这种方法尚没有先例可循，连续监测和电源的优化配置需要深入研究，大功率恒电位仪和智能调节系统也有待开发。同时，考虑到经济性，主动式缓解方案可能需要与传统缓解方法组合使用，其协作问题也有待研究。

除了在管道上增加缓解措施，还可以改造接地极。新Benmore-Haywards系统改造了深井接地极，降低了接地电阻，因此大幅降低了附近跨步电压，满足了安全要求[8]。这为缓解HVDC干扰提供了新的思路：当管道方缓解措施难于施工或成本太高时，可以考虑在电力方进行改造。

6 存在的问题和未来展望

(1) HVDC造成的腐蚀机制有待研究。当HVDC单极运行时干扰程度较严重，管道表面可能出现与小电流直流干扰时不同的界面状态和界面反应，实际反应机理、控制步骤、反应产物、极化特性等也可能不同。当HVDC双极运行时入地电流为动

态不平衡电流，这种情况下的腐蚀机制与稳态直流干扰也可能有区别。未来需要分别研究这两种不同运行方式下的腐蚀机制。

(2) 缺乏针对HVDC干扰的有效检测方法及相关标准。现有的检测手段如管地通电电位、地电位梯度等无法精确评价干扰程度；使用试片泄露电流密度法虽然可以定量描述腐蚀/析氢反应的速率，但尚无现场应用实例。另外还有管中电流密度检测、ER腐蚀探头检测等新型检测方法，但实用性及可靠性没有得到验证。与此对应，关于HVDC造成的安全问题和腐蚀问题也没有评价标准。未来可能需要综合多种手段的检测体系和标准，以全面评价干扰带来的安全、腐蚀、氢脆等问题。

(3) HVDC干扰的模拟计算技术需要提高。HVDC的干扰范围可达上千公里，在此范围内土壤环境、管道状态、阴保和干扰水平等复杂多变，钢铁的极化特性也大不相同。如何精确获取这些数据，建立大尺度下的精确模型，并高效求解，是未来的发展方向。

(4) 实际复杂体系的影响因素及规律仍需进一步研究。现有的模拟计算和测试已经对一些土壤和管道参数作出分析，但仍有大量现实参数尚未研究，如管道涂层、漏点、套管、绝缘接头、各种接地、牺牲阳极系统、真实土壤等。以上参数可能影响入地电流在管道中的流动，需要定量分析其影响规律。

(5) 针对我国现实的干扰缓解技术需要开发。我国HVDC干扰量极大、范围广，一般的直流干扰缓解技术并不能满足需求，目前许多干扰案例仍未得到有效缓解。如何设计缓解、消除管道安全隐患，是一个紧迫的现实问题。应尽快进行缓解技术的相关研究和实验，验证传统方法和主动式缓解的效果，制定通用的、标准化的缓解措施和规范，开发新型设备并应用于实际缓解工作。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1

[2] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎等. ±800kV 6400MW特高压直流输电工程设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1

[3] 刘泽洪, 高理迎, 余军. ±800kV特高压直流输电技术研究 [J]. 电力建设, 2010, 28(10): 17

[4] 詹奕, 尹项根. 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 44

[5] Larruskain D M, Abarrategui O, Zamora I, et al. Transmission and Distribution Networks: AC versus DC [A]. 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering [C]. Marbella: AEDIE and APDEE, 2005: 245

[6] 周浩, 钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 6

[7] Nicholson P. High voltage direct current interference with underground/underwater pipelines [A]. Proceedings of the Corrosion 2010 [C]. San Antonio: NACE International, 2010: 10102

[8] O'Brien M T, Zavahir M, Clark M, et al. New Zealand bipolar HVDC earth/sea return operation- environmental experiences [A]. Cigré Sessions [C]. Pairs: 2006: B4-206

[9] Caroli C E, Santos N, Kovarsky D, et al. Itaipu HVDC ground electrodes: interference considerations and potential curve measurements during Bipole II commissioning [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 1990, 5(3): 1583

[10] Verhiel A J. The effects of high-voltage DC power transmission systems on buried metallic pipelines [J]. IEEE Trans. Ind. Gen Appl., 1971, 7(3): 403

[11] Zhang B, Zeng R, He J, et al. Numerical analysis of potential distribution between ground electrodes of HVDC system considering the effect of deep earth layers [J]. IET Gener. Transm. Distr. 2008, 2(2): 185

[12] 王雁冰. 川气东送管道杂散电流排流工程技术研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2010

[13] 程明, 张平. 鱼龙岭接地极入地电流对西气东输二线埋地钢质管道的影响分析 [J]. 天然气与石油, 2010, 28(5): 22

[14] 李丹丹. 高压直流输电线路对某埋地金属管道的干扰规律研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2014

[15] Girdinio P, Molfino P, Nervi M, et al. Technical and compatibility issues in the design of HVDC sea electrodes [A]. 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). [S.l.] [C]: Rome, 2012: 1

[16] 王官洁, 任震编. 高电压直流输电技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社. 1997

[17] Liu J, Dawalibi F P, Ma J, et al. HVDC advanced analysis methods for grounding design and DC interference mitigation techniques [A]. 3rd IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.] [C]: Beijing, 2002: 202

[18] GB/T 3805-2008. 特低电压(ELV)限值 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008

[19] 高理迎, 郭贤珊, 董晓辉. 接地极入地电流对杆塔腐蚀及防护研究 [J]. 中国电力, 2009, 42(12): 38

[20] Wu C, Yang W, Zhu K, et al. Research on the effects and evaluation method of transmission line tower grounding collection caused by DC current [A]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific [C]. Wuhan, 2011: 1

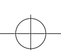
[21] 郭剑. 直流接地极对电气化铁路的电磁影响 [J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 241

[22] Hopper A T, Gideon D N, Berry W E, et al. Analysis of the effects of high-voltage direct-current transmission systems on buried pipelines [R]. Falls Church: PRCI, 1967

[23] 张富春, 郭婷, 黎晓辰等. ±800 kV与±500 kV换流站共用接地极时入地电流对极址附近电位分布的影响 [J]. 电力建设, 2014, 35(7): 115

[24] GB 50991-2014. 埋地钢质管道直流干扰防护技术标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014

[25] DL/T 5224-2005. 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规



定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005

[26] Caroli C E, Santos N, Kovarsky D, et al. Soil surface potentials induced by Itaipu HVDC ground return current. II. Measurements [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 1988, 3(3): 1211

[27] Lagace P J, Houle J L, Gervais Y, et al. Evaluation of the voltage distribution around toroidal HVDC ground electrodes in n-layer soils [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 1988, 3(4): 1573

[28] 陈水明, 施广德. 圆环形直流输电接地极电流场分析 [J]. 高电压技术, 1994, 20(1): 3

[29] Kovarsky D, Pinto L J, Caroli C E, et al. Soil surface potentials induced by Itaipu HVDC ground return current. I: Theoretical evaluation [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 1988, 3(3): 1204

[30] 徐韬, 徐政, 张哲任等. 特高压直流输电圆环型接地极电流场计算 [J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1445

[31] 陆继明, 肖冬, 毛承雄等. 直流输电接地极对地表电位分布的影响 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 55

[32] Jardini J A, Vasquez-Arnez R L, Kovarsky D, et al. Interference of a line-commutated converter high-voltage direct current system upon pipelines located in its vicinity [J]. Int. Trans. Electr. Energy Syst., 2014, 24(12): 1688

[33] Chen F, He J L, Zhang B. Study of the influence of UHVDC systems shared grounding electrode on the environment [A]. Power Engineering and Automation Conference [C]. Wuhan, 2011: 344

[34] Ruan W, Ma J, Liu J, et al. Performance of HVDC ground electrode in various soil structures [A]. Proceedings of IEEE Conference on Power System Technology. [S.l.] [C]: Kunming, 2002: 962

